

マイクロコンピュータ素子を応用した 動物行動自動制御測定装置の試作

三宅 浩次 池田 聡子

(札幌医科大学公衆衛生学講座 主任 三宅浩次教授)

A Trial Production of an Experimental System in Which a Microprocessor is Applied for Automatic Controlling and Analysing Animal Learning Behaviors

Hirotsugu MIYAKE and Toshiko IKEDA

Department of Public Health, Sapporo Medical College

(Chief: Prof. H. Miyake)

Application of behavioral techniques to the assessment of environmental pollutants was recently proposed. Since 1974, we have been studying the effects of some environmental pollutants on operant learning behaviors in the rat. Behavioral toxicological experiments generally produce massive data, therefore necessity compelled us to devise an automatic data processing system for the improvement of efficiency.

In this paper, a trial production of equipment to which a microprocessor is applied for the automatic controlling of four Skinner boxes and for automatic analysis of the data is described. A trial run gave satisfactory results. Studies on dose-response relationship, at a four dose level, became possible by operating four Skinner boxes simultaneously. (Received March 10, 1978 and accepted April 28, 1978)

1 はじめに

環境汚染物質の生体影響検出システムに関する研究の一環として、われわれは各種汚染物質の投与による動物の学習行動変化を検出する方法を検討している^{1,2)}。学習行動そのものの研究装置は、動物心理学や学習心理学の領域で種々開発されている。また、この種の装置の応用によって、行動薬理学の領域で、各種向精神薬の試験が行われている。環境科学の一分科として、行動毒性学 (behavioral toxicology) が誕生し、ようやく 1975 年に初めての単行本³⁾も出版され、この術語が定着しつつある段階にある。

われわれは、最初 (1974 年) 1 台のスキナー型学習箱を使って、ダイオキネズミの学習行動を観察するところから、行動毒性学の研究を開始した。しかし、学習装置から得られるデータ量は龐大であり、たとえ 1 台の学習箱でも、その観察・記録・解析に要する時間は、研究者にとって大きな負担であった。しかも、多種類の物質について、用量や暴露条件の組合せを考えると、実験の効率向上を図ることが重要課題となった。そこで、学習箱を 2 台に増設し、集積回路 (IC) 素子を応用して、当時もっとも低価格のプリンター付計算器と、中古の紙テープパンチャーを組合せた自動処理装置を試作した (札幌医大電算機委員会

ニュース, No. 4, 昭和 51 年 2 月に記事あり)。しかし、この程度の改善では、まだまだ充分とはいえなかった。

今回は、4 台の学習箱 (つまり同時に 4 匹の動物学習行動をみる事ができる、用量を考えると、対照と用量 3 段階が 1 度に観察可能となる) について、これらを制御し、データを集計し、プリンターに出力させる装置の製作を試みた。複数の学習箱を制御する方法として、ミニコンピュータを利用するシステムは、すでに米国等で実用化しているが、きわめて高価なものである。この報告では、最近めざましく普及してきたマイクロコンピュータ素子を応用して、より安価で、小型の制御装置を試作して、所期の目的を達しようとした点に新しい工夫がなされている。

2 装置の基本構想

2.1 対象とする動物行動

動物行動のうち、とくに学習行動を観察・分析することを目標とする。学習行動といっても、古典的条件づけをはじめ多種の行動が含まれるが、ここでは道具的条件づけのうち、さしあたり 2 種の強化スケジュールを対象としてシステムを構成する。ただし、今後の発展性を考慮し、これらのスケジュールに可変性をもたせるため、スケジュールはソフトウェアとする。ソフトウェアの一部の変数は、外部

スイッチにより数値 (10 進数) を与えられるようにする。

2.2 学習箱との接続

学習箱は、4 台接続できるようにする。各学習箱と本装置との接続は、入力信号 (動物の反応; 学習箱のレバー接点の開閉) と出力信号 (強化のための信号; 餌出し器のドライブ) とする。この接続線は、機器の安全性のために、途中で電磁リレーを入れ、電気的に非接続とする。

2.3 強化スケジュール

具体的な強化スケジュールは、FR (fixed ratio, 一定回数レバーを押すと強化されるスケジュール) と DRL (differential reinforcement of low rate, 一定秒数待ってからレバーを押すと強化される, 設定秒数前の反応はキャンセルされるスケジュール) とする。この両スケジュールの設定数を外部スイッチによりセットできるようにする。

2.4 データ集計・プリント

データ集計は、5 分毎に各学習箱の状態をプリンターに打出す。1 試行は 40 分または 60 分で終了とする。スケジュールの選択 (FR か DRL か)、試行日時、1 試行時間等の変数は外部スイッチによりセットできるようにして、プリントにも表示する。DRL スケジュールのときは、1 試行後に各学習箱毎に全反応時間間隔 (IRT, interresponse time) の一覧表をプリントさせる。

2.5 反応時間の不応期

学習箱のレバーの開閉は、チャタリング (バネのはね返りなどで開閉が短時間に複数個発生する現象) や、きわめて短時間の複数個の反応を、1 個を越えて記録しないようにするために、25 msec の不応期を設定する。

以上のような比較的複雑な操作を、低価格で、しかも信頼性の高い機器として構成するためには、マイクロコンピュータの応用が最適であると判断した。

3 マイクロプロセッサ

1971 年にインテル社が、4004 と型名を名づけた LSI (large scale integration, 大規模集積回路) を開発したのがマイクロコンピュータの誕生とされている。その後、インテル社は、1973 年に 8080 を発表した。これは現在、マイクロプロセッサ (マイクロコンピュータの心臓部, CPU [central processing unit]) として、もっとも普及しているものの一つである。この LSI には、4.2 mm×4.9 mm 四方の半導体素子の中にトランジスタに換算して約 4,500 個分の回路が組込まれている。実用上としては、配線の問題があるので、約 50 mm×7 mm×1.2 mm のプラスチックの中に収められ、配線用のピンが 40 本下部に突き出した製品としている (図-1)。各ピンは、それぞれの機能を有し (図-2)、例えば、ピン 13 に 5 V の電圧がかかると、ホー

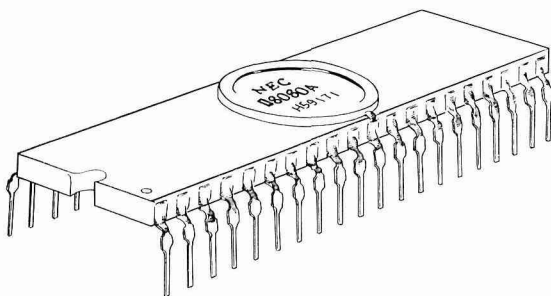


図-1 本装置に使用した CPU

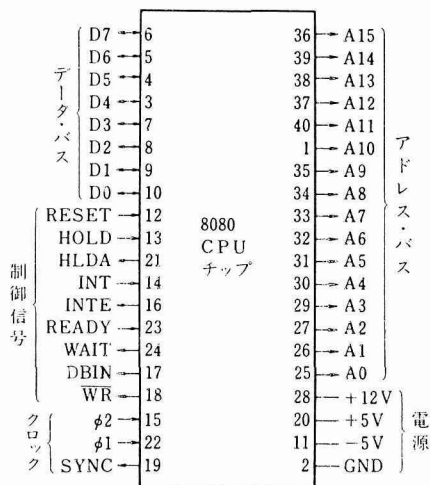


図-2 8080 のピン配列

ルド状態、つまり停止状態になる。ピン 12 に電圧がかかると、リセットされ、メモリーの 0 番地に入っている命令が実行される。この命令を実行させるために、ピン 15, 22 にクロック・パルスを送ってやる必要がある。通常 2.048 MHz、つまり 1 クロック・サイクルが 0.488 μ sec で動作している。1 命令は、命令の種類によって長さが違うが、4~17 クロック・サイクルなので、1.95~8.30 μ sec の時間に行われていることになる。

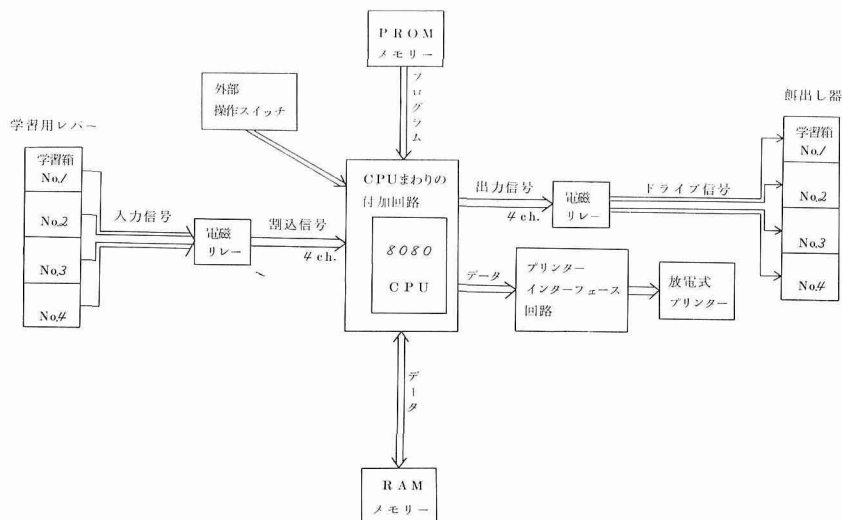
本試作装置では、この 8080 と同一機能を有する日本電気製の μ PD 8080A を CPU として使用することにした。

4 装置の構成

4.1 ハードウェア

本装置をハードウェアとしてみた場合、その主たる構成は、図-3 の通りであり、主要部品類は表-1 に示す通りである。

マイクロプロセッサは前述の 8080 であるが、各種外部機器やスイッチとの関係で、付加的な周辺回路が組込まれている。さらに時間表示などを加え、TTL (transistor



図—3 ハードウェアの主たる構成

表—1 ハードウェア構成概要

C P U	μPD 8080A (日本電気製)	インテル 8080 相当品
メ モ リ ー	PROM μPD 454	256 バイト/チップ×16 チップ=4 K バイト
	RAM μPD 2101 C-4	128 バイト/チップ×32 チップ=4 K バイト
入 力	学習箱からの接点開閉信号 (4 チャンネル)	
出 力	放電式プリンター	
	学習箱への餌出し信号 (4 チャンネル)	
電 源	DC 5 V	CPU, メモリー用
	12 V	
	-5 V	
	DC 28 V	電磁リレー, 餌出し器用
	DC 26 V	プリンター用



図—4 本装置の外観

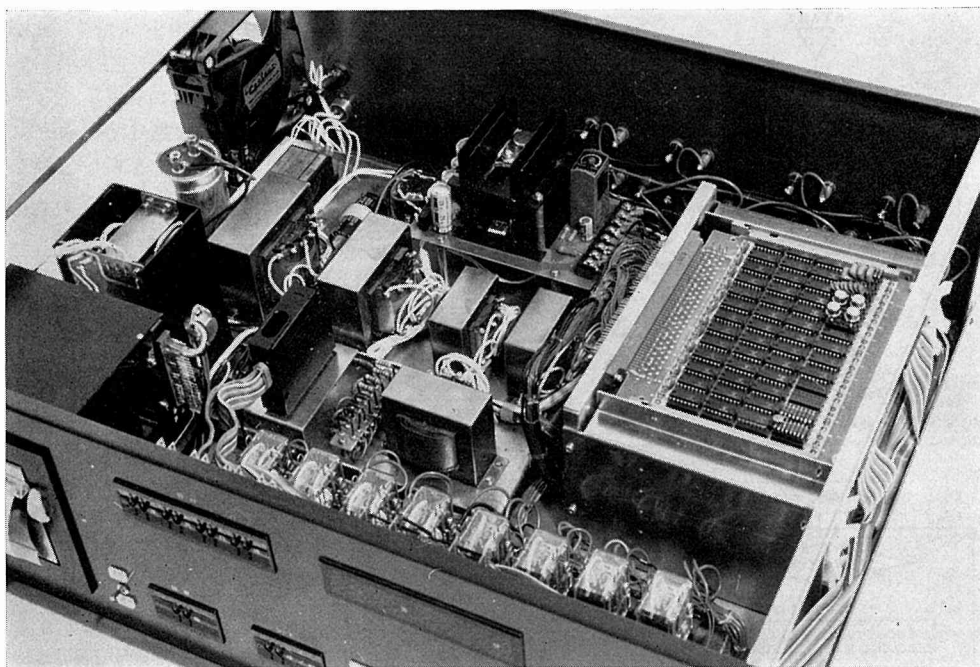


図-5A 本装置の内面

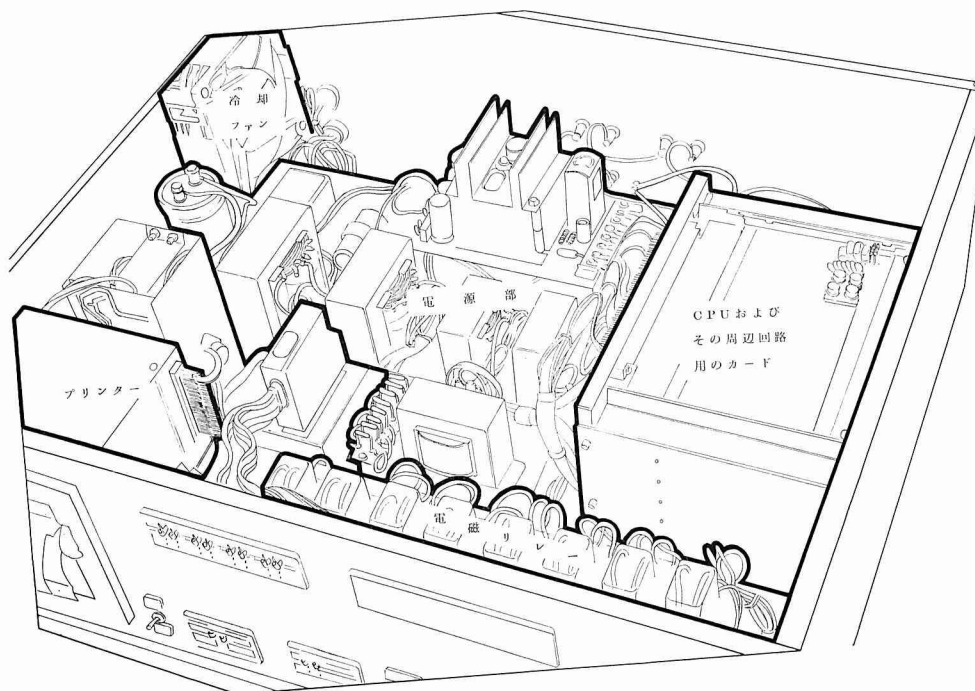
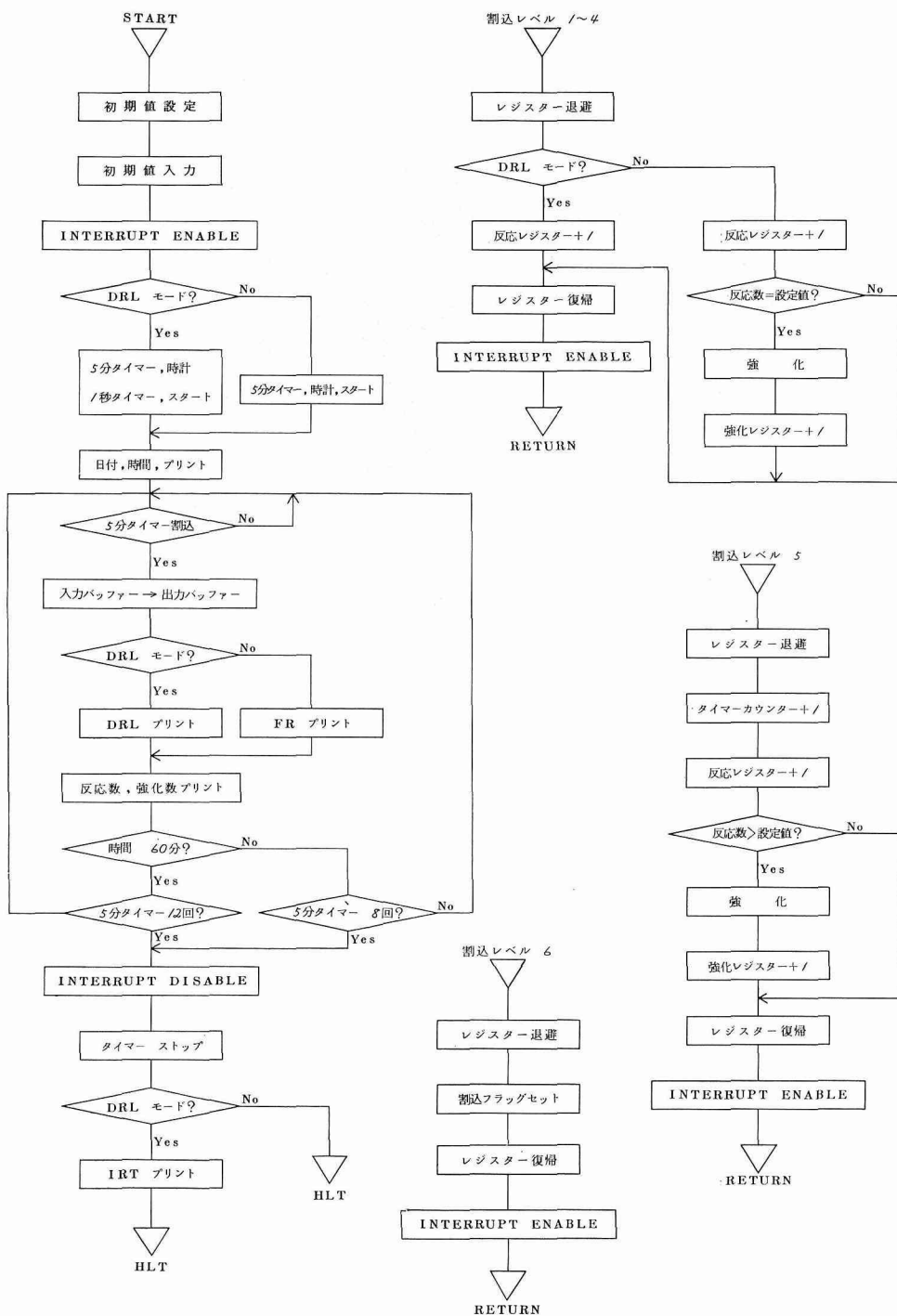


図-5B 本装置の内面



図—6 フローチャート

transister logic) の IC を約 30 個使った。

クロック・パルスは、 μ PB 8224 D の LSI とクリスタルで 2 MHz を発生させ、CPU の制御と、システムの時間制御 (DRL の 1 秒、5 分毎のプリント命令など)、パネルの時間表示 (実験開始後の分・秒を LED [light emitting diode] により表示) などに使用した。

メモリーは、プログラムを常時格納しておくために PROM (programmable read only memory) を、データを格納するために RAM (random access memory) を使用した。PROM は 1 チップ 256 バイトの μ PD 454 を 16 チップ、つまり合計 4 キロバイトを、RAM は 1 チップ 128 バイトの μ PD 2101 C-4 を 32 チップ、合計 4 キロバイトを使用した。メモリーと CPU の間には、データ・バスとアドレス・バスで接続している。なお、DRL スケジュール時の IRT データは、CPU をホールド状態にして、直接メモリーからプリンターへはき出す DMA (direct memory access) 方式をとっている。

(本装置の外観および内面を 図-4, 5 (A, B) に示した)

4.2 ソフトウェア

本装置を操作するプログラムは、PROM に格納されているので、電源を切っても消失することはなく、電源スイッチ (パワー・スイッチ) を入れ、実験開始スイッチ (ラン・スイッチ) を入れることにより、直ちに自動制御下に実験を開始できる。

FR と DRL の両スケジュールのプログラムをフローチャートにして、図-6 に示した。実際のプログラムは、78 種類の命令の組合せで作られる。1 命令は 8 ビット (1 バイト) または 2 または 3 バイトの長さをもつ。例えば、01111000 という 1 バイト長の命令は、8080 内にある B レジスタの内容 (ここでは 1 バイトの数値) を A レジスタへ移せという意味になり、これが PROM のある番地に命令として格納されている。本装置では、PROM が 4 キロバイト分積んであるので、もし平均 2 バイト長の命令とすると、約 2,000 ステップの命令を入れることができる。ラン・スイッチを入れたと、装置がリセットされ、メモリーのゼロ番地の命令から、以下順に次の番地 (2 または 3 バイト長の命令なら、その分だけ複数の番地に命令が入っているので、次の命令が入っている番地までとんで) の命令を実行して行く。

今後、プログラムの変更や追加が必要であれば、新たに焼付けた PROM をさしかえるとい (本装置に使用した PROM は、電氣的にメモリー消去を行って再焼付けが可能である。もっとも、ソフトウェアの開発費は高額であるが)。

01-10-13-05-02	02-24-15-37-23 ⑨
FR 30-1-01-0001-0000	E-10
2-01-0031-0001	DRL 12-1-01-0031-0013
3-01-0271-0009	E-13
4-01-0210-0007	C-20
	2-01-0033-0011
	E-2
	4-01-0025-0009
FR 30-1-02-0000-0000	
2-02-0104-0006	
3-02-0270-0009	DRL 12-1-02-0019-0015
4-02-0100-0006	2-02-0028-0011
	3-02-0025-0014
	4-02-0024-0011
FR 30-1-03-0000-0000	
2-03-0170-0005	DRL 12-1-03-0019-0018
3-03-0229-0007	2-03-0032-0015
4-03-0194-0006	3-03-0027-0012
	4-03-0024-0010
FR 30-1-04-0000-0000	
2-04-0035-0002	DRL 12-1-04-0020-0019
3-04-0256-0009	2-04-0023-0017
4-04-0144-0005	3-04-0023-0014
	4-04-0023-0016
FR 30-1-05-0000-0000	
2-05-0210-0007	DRL 12-1-05-0019-0013
3-05-0156-0005	2-05-0025-0016
4-05-0112-0004	3-05-0029-0012
	4-05-0021-0013
FR 30-1-06-0000-0000	
2-06-0255-0008	DRL 12-1-06-0023-0018
3-06-0000-0000	2-06-0022-0014
4-06-0140-0004	3-06-0023-0018
	4-06-0022-0017
	DRL 12-1-07-0024-0014
	2-07-0023-0016
	3-07-0028-0013
	4-07-0021-0015
	DRL 12-1-08-0026-0017
	2-08-0024-0019
	3-08-0024-0012
	4-08-0021-0016
01-10-13-41-02	TRT-1 E-10
FR 30-1-01-0305-0010	07 10 02 06 02 08
2-01-0250-0008	01 09 02 29 12 13
3-01-0150-0005	16 14 00 12 10 01
4-01-0000-0000	00 11 01 00 01 14
	13 13 00 12 12 16
	14 :
FR 30-1-02-0001-0000	12 13 00 17 17 16
2-02-0204-0009	17 17 16 19 16 00
3-02-0090-0003	22 18 07 12 20 11
4-02-0000-0000	17 :
	22 19 15 17 17 16
FR 30-1-03-0000-0000	14 00 13 16 14 16
2-03-0363-0012	19 14 15 15 19 15
3-03-0132-0004	15 :
4-03-0000-0000	18 13 17 14 17 17
	16 17 16 14 13 13
FR 30-1-04-0000-0000	15 17 00 18 14 14
2-04-0344-0012	14 12 :
3-04-0114-0004	13 14 18 15 00 13
4-04-0000-0000	14 13 20 14 14 02
	18 10 51 31 11 03
FR 30-1-05-0000-0000	02 :
2-05-0349-0012	14 17 12 13 15 15
3-05-0005-0003	15 14 16 14 11 01
4-05-0000-0000	15 15 14 14 13 13
	12 11 01 01 12
FR 30-1-06-0000-0000	14 10 01 02 00 15
2-06-0300-0010	00 10 01 00 17 16
3-06-0121-0004	14 14 07 48 16 13
4-06-0000-0000	13 02 13 17 14 15

図-7 FR 30 および DRL-12 のプリント例

5 動作試験結果

本装置の動作を手動で（学習箱のレバー接点の開閉を手で）種々試験したが、プリント結果は正確であった。次にダイコクネズミ 60 匹について、CRF (FR-1 のこと、つまりレバーを 1 回押す毎に 1 個餌が与えられる) から FR-30 までの学習を行ったが、延約 240 時間の動作中、大きな障害は生じなかった (FR-30 およびその後行った DRL-12 のプリントの例を図-7 に示した)。ただし、電源が瞬時切れて、プログラムがリセットされたり、プリンターの用紙が入口でかんでしまっ、プリント内容の判読が困難になった事故が、それぞれ 1 度発生した。この事故も実験者が長時間装置監視から離れない限り、重大な事故にはならないと思われる。半導体素子の機器は、熱発生が問題になるが、小型のファンで冷却していることもあり、真夏時 10 時間位の連続使用でも、事故は起っていない。雑音発生も大きな問題であり、先に試作した TTL だけの IC 回路では、雑音による誤動作に悩まされたが、今回の試作品では、今のところ極めて少い。

6 二、三の考察

LSI 素子の開発は、医学関係の機器にも次々と応用され、その前途は極めて明るい。ただ惜しいことに、同じ応用開発を進めている工学関係に比べ、医学分野ではその進歩に多くの困難がある。今回、本装置を試作するに当たっても、エレクトロニクスの知識は、全くの独学であり、相談に乗ってもらえる電子工学者または技術者が、本大学内にはいない状態であった。医学全体の進展を考慮すると、医用電子工学 (medical electronics, または medical engineering) の教科または講座の設置が望まれるところである。もっとも、医療機器開発が経営的に有利なような医療制度へと変われば (今でも一部にはあるが)、多くの企業体が開発競争に加わり、様相は一変するかもしれない。それにしても、研究面への重要ではあるが地味な (不採算な) 投資は、大学側の組織として考慮するのが本筋かもしれない。

今回の装置試作時に気づいた第 2 の点は、北海道という地域的不利に関してである。本装置の試作を、最初地元で考えたが、種々考慮の末、東京の佐鳥電気株式会社に依頼することとなった。試作品にともなう、途中での設計の変更や、部品の調達などに、札幌・東京間の距離の遠さを感じさせられた。中央集権化の能率向上は、一方で地方の犠牲をとまっている。

将来、LSI はより使いやすく、より安価で信頼性をあげて行くものと予想される。すでに、8080 の上位機種 8085 が 1977 年から発売されている。8080 では、周辺にクロック用と、システム・コントロール用の LSI が必要であったのが、8085 では一つのチップに収められてしまい、機能も向上している。8080 の 1 チップの値段が、1977 年末では約 8,000 円で、2, 3 年前の数分の一にまで下がっている。使いやすさや作りやすさの向上は、今や中・高校生にまで、マイクロコンピュータ・ブームを巻き起している。

いずれにしても、LSI の医学領域への応用は、今後より急速、広範囲に浸透して行くものと思われる。

稿を終るに当たり、本装置の製作に尽力された佐鳥電機株式会社、および日本電機株式会社の関係者の方々に謝意を表す。

なお、本研究は文部省科学研究費の助成を受けた。

文 献

1. Ikeda, T. and Miyake, H.: Decreased learning in rats following repeated exposure to toluene: preliminary report. *Toxicology Letters* **1**, 235-239 (1978).
2. 池田聡子, 三宅浩次: ラットの学習能力におよぼすトリクロルエチレン長期暴露の影響, 第 50 回日本産業衛生学会講演集, 222-223 (1977).
3. Weiss, B. and Laties, V. G. (Ed.): *Behavioral Toxicology*, PLENUM PRESS, New York and London (1975).